



# Modelizacion prospectiva del paisaje mediante sistemas de informacion geografica

Martin Paegelow, Maria T. Camacho Olmedo, José Menor Toribio

## ► To cite this version:

Martin Paegelow, Maria T. Camacho Olmedo, José Menor Toribio. Modelizacion prospectiva del paisaje mediante sistemas de informacion geografica. X Congreso de Metodos Cuantitativos, sistemas de informacion geografica y teledeteccion, Sep 2002, Valladolid, España. pp.CD. halshs-01063019

**HAL Id: halshs-01063019**

**<https://shs.hal.science/halshs-01063019>**

Submitted on 11 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **MODELIZACIÓN PROSPECTIVA DEL PAISAJE MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**PAEGELOW, MARTIN**  
**CAMACHO OLMEDO, MARÍA TERESA**  
**MENOR TORIBIO, JOSÉ**

**Laboratorio GEODE. Universidad de Toulouse Le Mirail**  
**Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Granada**  
**Dpto. de Territorio y Patrimonio Histórico. Universidad de Jaén**

### **Resumen**

Los Sistemas de Información Geográfica incluyen entre sus funciones de análisis aquellas destinadas a la modelización espacio-temporal. En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de un método de modelización que combina el análisis de una serie cronológica de usos del suelo (Cadenas de Markov), con la puesta en relación de estos usos y un conjunto de variables explicativas (Evaluación multicriterio), para, por último, asignar a cada píxel una categoría de ocupación del suelo (Evaluación Multiobjetivo) en la fecha proyectada, proceso complementado con un algoritmo de automatismo celular que mide la contigüidad local. La modelización prospectiva de dos áreas de estudio comparables aunque con dinámicas paisajísticas específicas permite evaluar la metodología y precisar sus aportaciones y sus límites.

### **Palabras clave**

Modelización espacio-temporal, Sistemas de Información Geográfica, Dinámica del paisaje, Usos del suelo

### **1. Presentación**

El valle de los Garrotxes, en los Pirineos Orientales franceses, y la comarca de la Alta Alpujarra, en la vertiente sur de Sierra Nevada, como otras áreas montañosas mediterráneas, se ven afectados por una profunda reestructuración de índole económica, social y paisajística. Con el fin de reconstruir esta evolución, se ha venido desarrollando en el marco de un proyecto de investigación<sup>1</sup> un estudio paralelo de la ocupación del suelo como componente que mejor recoge el uso y las actividades de las sociedades en el espacio y que reacciona con cierta inercia a sus cambios a lo largo del tiempo. Tras el análisis pormenorizado de la dinámica de los usos del suelo en la segunda mitad del siglo XX, la base de datos espacial se ha completado con una serie de variables descriptivas y supuestamente explicativas de dicha evolución.

---

<sup>1</sup> « Dynamiques et modélisations de l'occupation du sol appliquées aux anthroposystèmes montagnards méditerranéens : Pyrénées – Sierra Nevada », Programme Environnement, Vie et Sociétés, C.N.R.S., Francia.

A partir de este punto, el objetivo es la aproximación a una modelización de tipo retrospectivo (para trazar la historia de los paisajes) y prospectivo (como ayuda a la toma de decisiones). Para ello se han puesto en marcha de manera simultánea tres tipos de métodos de modelización que permiten una comparación de sus resultados. En este trabajo se presentan los primeros resultados de uno de estos métodos, en concreto el basado en las funciones propias de los Sistemas de Información Geográfica.

## **2. Metodologías de modelización espacio-temporal**

La modelización para la obtención de una cartografía prospectiva y retrospectiva del paisaje de las áreas de estudio se apoya en tres métodos comparativos: el método estadístico de los datos funcionales, los algoritmos de redes neuronales y el método basado en los Sistemas de Información Geográfica.

- El método estadístico basado en datos funcionales (Cardot et al., 1999) consiste en una modelización que utiliza las funciones polinomiales considerando no solamente la ocupación del suelo sino también las variables ambientales supuestamente explicativas. La función integra, en consecuencia, la mayor parte de las capas de información de la base de datos espacial. A ello se une el hecho de que esta metodología, ante la excesiva distancia temporal de la serie cartográfica, construye indicadores intermedios que tienen en cuenta a la vez las variables y el efecto espacio-temporal. Los cálculos permiten obtener una serie de mapas de carácter prospectivo o retrospectivo.

- Los algoritmos de redes neuronales con múltiples capas se han convertido en métodos que, en determinadas ocasiones, aventajan a las funciones estadísticas clásicas, con la ventaja además de proponer soluciones no lineales (Bishop, 1994). El objetivo en este proyecto es el de proponer una red de neuronas y estudiar las propiedades en un marco lo más amplio posible, puesto que se trata de datos espacio-temporales a los que hay que añadir variables explicativas suplementarias. Por ello, la utilización de este método resulta adecuada ya que tiene en cuenta el carácter correlacionado de las variables tanto de naturaleza cronológica como espacial.

- Por último, el método basado en los Sistemas de Información Geográfica se apoya en la constatación de diferencias significativas de comportamiento espacio-temporal en relación con una repartición teórica supuesta (espacio homogéneo e isótropo), analizando de hecho el impacto de la “rugosidad” geográfica. Esta rugosidad está formada por el conjunto de variables conocidas, disponibles y cartografiadas a una escala compatible con la serie cronológica de los mapas de usos del suelo.

En las páginas siguientes se muestran, en concreto, los resultados de la utilización de un SIG ráster (SIG Idrisi 32 Release 2) en un ensayo de modelización prospectiva de las áreas de estudio. Se ha buscado la proyección de la situación probable en los años 2000 (Garrotxes) y 2001 (Alta Alpujarra) para poder compararla con la cartografía real de los usos del suelo en las mismas fechas y evaluar así la metodología.

### **3. Método de modelización prospectiva utilizando Sistemas de Información Geográfica**

En los últimos años, los SIG comerciales han ido incorporando como funciones de análisis aquellas destinadas a la modelización. Es el caso de la función CA\_MARKOV, que ha sido incluido en la última versión del SIG IDRISI como módulo experimental, enriqueciendo el bloque dedicado al análisis de series temporales. Esta función tiene la virtud de integrar la modelización temporal (basándose en una serie cronológica de usos del suelo) y la lógica basada en la Evaluación multicriterio y multiobjetivo (mediante la puesta en relación de las categorías de usos del suelo y un conjunto de variables de diversa naturaleza que pueden explicar o describir su dinámica), es decir, complementa el análisis multitemporal con el análisis multivariable para obtener una modelización más ajustada a la dinámica real de los paisajes.

Las funciones necesarias para la aplicación de esta metodología son en particular:

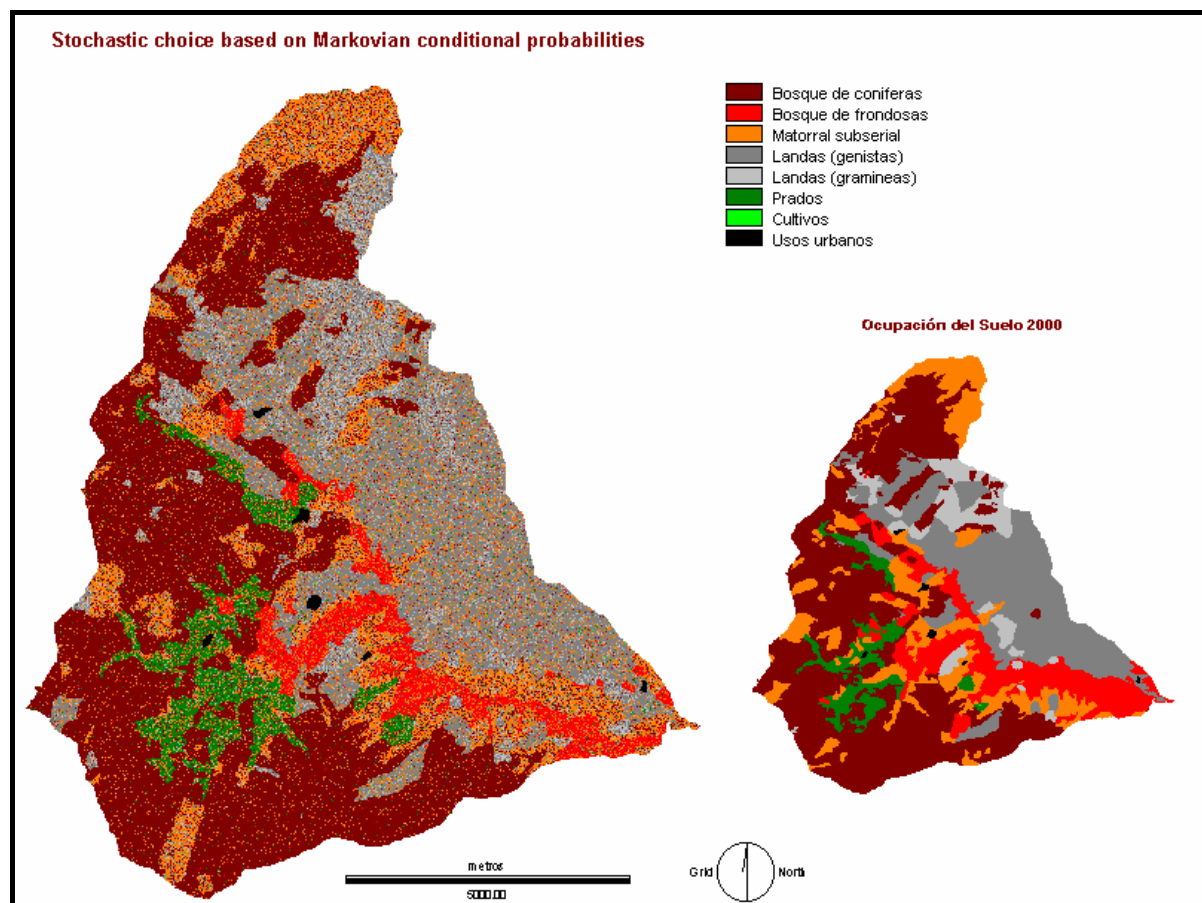
- Cadenas de Markov (MARKOV) y proyección estocástica (ST\_CHOICE)
- Evaluación multicriterio (EMC)
- Evaluación multiobjetivo y Cadenas de Markov acopladas a un algoritmo de automatismo celular (CA\_MARKOV)

#### **3.1. Cadenas de Markov y proyección estocástica**

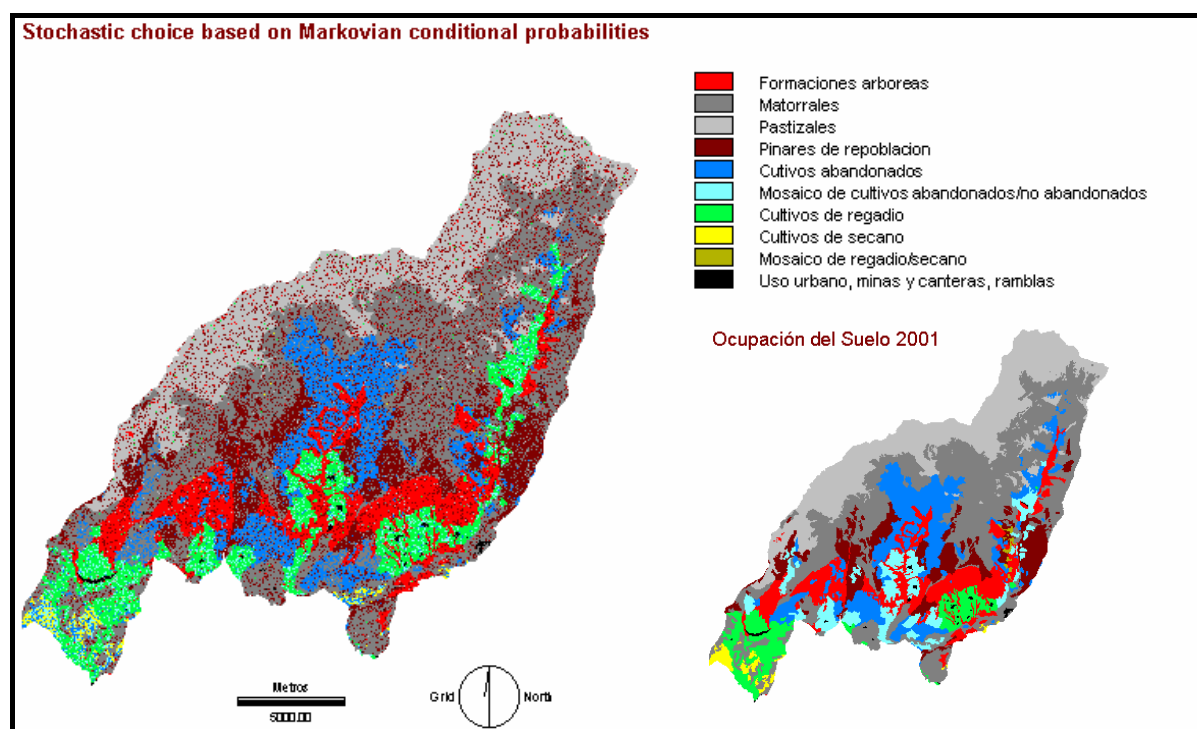
El módulo de las Cadenas de Markov simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo  $t_1$  a partir de dos estados precedentes  $t_0$  y  $t_{-1}$ . Esto significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema, que, en nuestro caso, corresponde a la evolución de los usos del suelo.

Como resultado se obtiene una matriz de probabilidades de transición entre todas las categorías de ocupación del suelo, una matriz de áreas de transición donde se indica el número de píxeles que pueden sufrir una transformación (documento necesario para la aplicación de la función CA\_MARKOV), y, por último, una serie de mapas de probabilidad condicional (0-1) para cada una de las categorías en el tiempo  $t_1$ , como proyección desde  $t_0$ . Para ello se tiene en cuenta el número de unidades temporales (años en nuestro caso, que definen el número de iteraciones) transcurridos entre  $t_1$  y  $t_0$ , y entre esta última fecha y la que se pretende modelizar ( $t_1$ ), asumiendo una evolución lineal.

Por último, el módulo de proyección estocástica (ST\_CHOICE) evalúa para cada píxel la probabilidad de pertenecer a una u otra categoría y configura un mapa único que soluciona las incompatibilidades entre ellas (Evaluación multiobjetivo). Los mapas de probabilidad o proyección estocástica de 2000 (Garrotxes) (Figura 1) y 2001 (Alta Alpujarra) (Figura 2) pueden así ser comparados con los mapas reales cartografiados para dichas fechas, y con aquellos obtenidos mediante la función CA\_MARKOV (Ver Apartado 4).



**Figura 1 – Proyección estocástica en 2000 (basado en 1980 y 1989) y Ocupación del suelo real en 2000.**  
 Garrotxes  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 2 – Proyección estocástica en 2001 (basado en 1957 y 1987) y Ocupación del suelo real en 2001.**  
 Alta Alpujarra  
 Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Evaluación multicriterio (EMC)

La evaluación multicriterio (EMC) se basa en la ponderación y compensación de variables, ya sean determinantes o bien factores de aptitud, y permite obtener mapas que expresan la evolución potencial para cada categoría de usos del suelo. Para ello se ha tomado como referencia la fecha previa a la proyección (1987 en la Alta Alpujarra, 1989 en los Garrotxes). Las variables que configuran la base de datos han sido elegidas por ser explicativas o descriptivas de la dinámica del paisaje en las áreas de estudio (Camacho et. al., 2000) (Cuadro 1).

**Cuadro 1 – Variables de la base de datos espacial (Alta Alpujarra)**

Ficheros/mapas de origen	Función para la obtención de mapas derivados	Descripción
Modelo Digital del Terreno 1:25000 (IGN)	-	Altitudes
	Cálculo de pendientes	Pendiente en grados
	Cálculo de orientaciones	Orientaciones en grados
Base de Datos Digital 1:25000 (IGN)	Cálculo de distancias	Distancia a los núcleos de población
	Cálculo de distancias y ponderación	Distancia a vías asfaltadas (0.6) y no asfaltadas (0.4)
	Cálculo de distancias	Distancia a la red de acequias
Mapas temáticos		Unidades litológicas
		Unidades geomorfológicas
		Unidades edafológicas
		Pisos bioclimáticos
		Series de Vegetación Potencial
		Existencia/ ausencia de terrazas de cultivo

Fuente: elaboración propia

Mediante la función CROSSTAB se obtienen las cifras absolutas y relativas de la superposición de cada variable y del mapa de usos del suelo, así como un índice de asociación o correlación (Cramer's V). Estos datos facilitan la elección de las variables más significativas y la configuración de las *restricciones* y los *factores*.

1. Las *restricciones* corresponden a mapas binarios (0/1) en donde las zonas excluidas del análisis (valor 0) pueden corresponder al fondo no útil de la imagen, a categorías de usos del suelo incompatibles con la analizada, o bien a las clases o intervalos de aquellas variables significativas donde se ha comprobado la ausencia justificada de dicha categoría.
2. Los *factores* son mapas cuyos niveles digitales se distribuyen en una escala Standard, desde 0 (nada apto) a 255 (muy apto), en función del uso del suelo analizado. Para la configuración de dichos mapas, y en función de la naturaleza cualitativa o cuantitativa de cada variable y de su grado de asociación con el mapa de usos del suelo, se ha optado por diversos métodos:
  - Standarización de las variables cuantitativas cuya gradación ascendente o descendente se adecue al uso del suelo analizado.

- Ponderación de las clases o intervalos de las variables cuantitativas o cualitativas en función de la ocupación del uso del suelo analizado.
  - o Ponderación según el porcentaje real
  - o Ponderación según el porcentaje real y su relación con la distribución normal de la variable (sobreestimación – subestimación).

A estos factores, que no son sino reclasificaciones o adaptaciones lineales de las variables de la base de datos, se les han añadido otros cuyo origen está en el propio mapa de usos del suelo de referencia:

- Ponderación de la distancia al uso del suelo analizado en función de la alta potencialidad de transformación de las áreas contiguas (0 – distancia superior a n metros, nula potencialidad, 255 – uso analizado, máxima potencialidad).
- Ponderación de las diferentes categorías de usos del suelo según la potencialidad de transformación en el uso analizado (0 – uso incompatible, nula potencialidad, 128 – uso compatible, potencialidad media, 255 – uso analizado, máxima potencialidad).

El cuadro 2 muestra, a modo de ejemplo, el conjunto de restricciones y factores elegidos para la categoría de bosque de coníferas en los Garrotxes.

**Cuadro 2 - EMC de la categoría “bosque de coníferas” en los Garrotxes en 1989**

Restricciones	Fichero de origen	Función aplicada	Descripción
1º	Usos del suelo 1989	Reclasificación	0 = fondo de la imagen y usos urbanos
2º	Altitudes	Reclasificación	0= <1000 m y >2400 m
Factores	Fichero de origen	Función aplicada	Descripción
1º	Altitudes	Reclasificación	Ponderación según distribución normal (nivel de confianza 99% y 99.9%)
2º	Pendientes	Reclasificación	Ponderación según distribución normal (Idem)
3º	Orientaciones	Reclasificación	Ponderación según distribución normal (Idem)
4º	Accesibilidad	Reclasificación	Ponderación según distribución normal (Idem)
5º	Usos del suelo 1989	Cálculo de distancias y ponderación mediante lógica difusa (Fuzzy, j-shaped, simétrica)	Ponderación según distancia (-0.1, 0, 100 y 400 metros) al bosque de coníferas

Fuente: elaboración propia

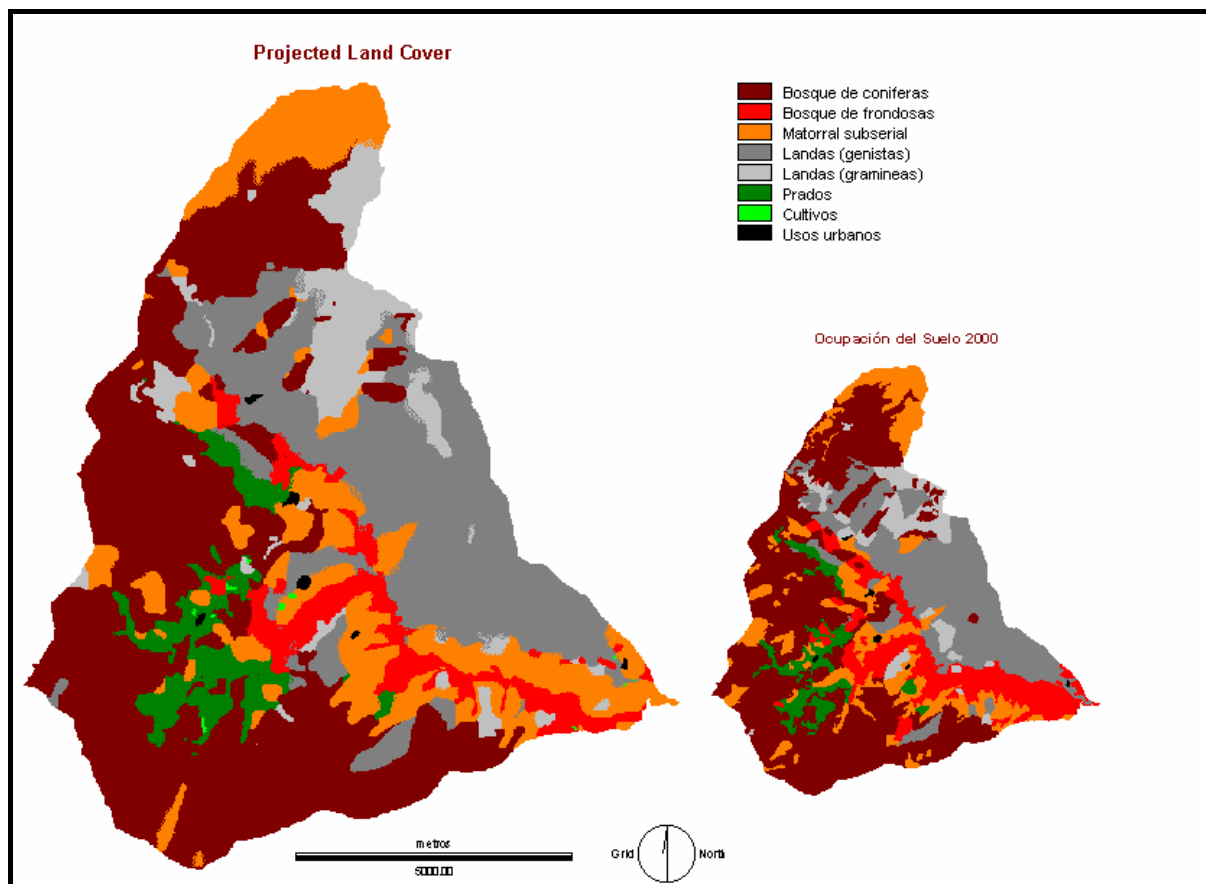
La aplicación del módulo de Evaluación multicriterio (EMC) exige, por último, la indicación de pesos o ponderaciones para cada factor. Para ello se han obtenido diversos índices de asociación (Cramer's V, Índice de correlación de Pearson) entre cada categoría de usos del suelo y cada uno de los factores, lo que permite ordenarlos por su mayor o menor correlación y facilita la construcción de la matriz de pares de variables. Esta matriz es considerada como uno de los métodos más usuales para la obtención de las ponderaciones.

El resultado de este proceso es una serie de n mapas de potencialidad (0-255) para cada una de las categorías de usos del suelo, a partir de la constatación de las relaciones entre las variables de la base de datos y los usos del suelo en 1987/1989.

### **3.3. Evaluación multiobjetivo (EMO) y Cadenas de Markov acopladas a un algoritmo de automatismo celular**

Los tratamientos anteriores se integran finalmente en la función CA\_MARKOV, en donde no sólo se tiene en cuenta el análisis de la serie cronológica de usos del suelo para la modelización (Cadenas de Markov), sino también la relación entre estos usos y las variables de la base de datos (Evaluación multicriterio), para, por último, asignar a cada píxel una categoría de ocupación del suelo (Evaluación Multiobjetivo) en la fecha proyectada. A la vez un algoritmo de automatismo celular (con filtro medio booleano 5x5) mide la contigüidad local y su resultado es multiplicado por los mapas de aptitud obtenidos en la fase de Evaluación Multicriterio, incrementando la probabilidad de pertenecer a una categoría por vecindad.

Los requerimientos necesarios para la aplicación de esta función son el mapa de usos del suelo de referencia utilizado para la aplicación de las Cadenas de Markov (1987, Alta Alpujarra, y 1989, Garrotxes), la matriz de áreas de transición (Cadenas de Markov), los mapas de aptitud para cada categoría de usos del suelo (Evaluación multicriterio), y la indicación del número de iteraciones (que deben coincidir con los años de extrapolación para el cálculo de la proyección) y del tipo de filtro para el análisis de contigüidad local.

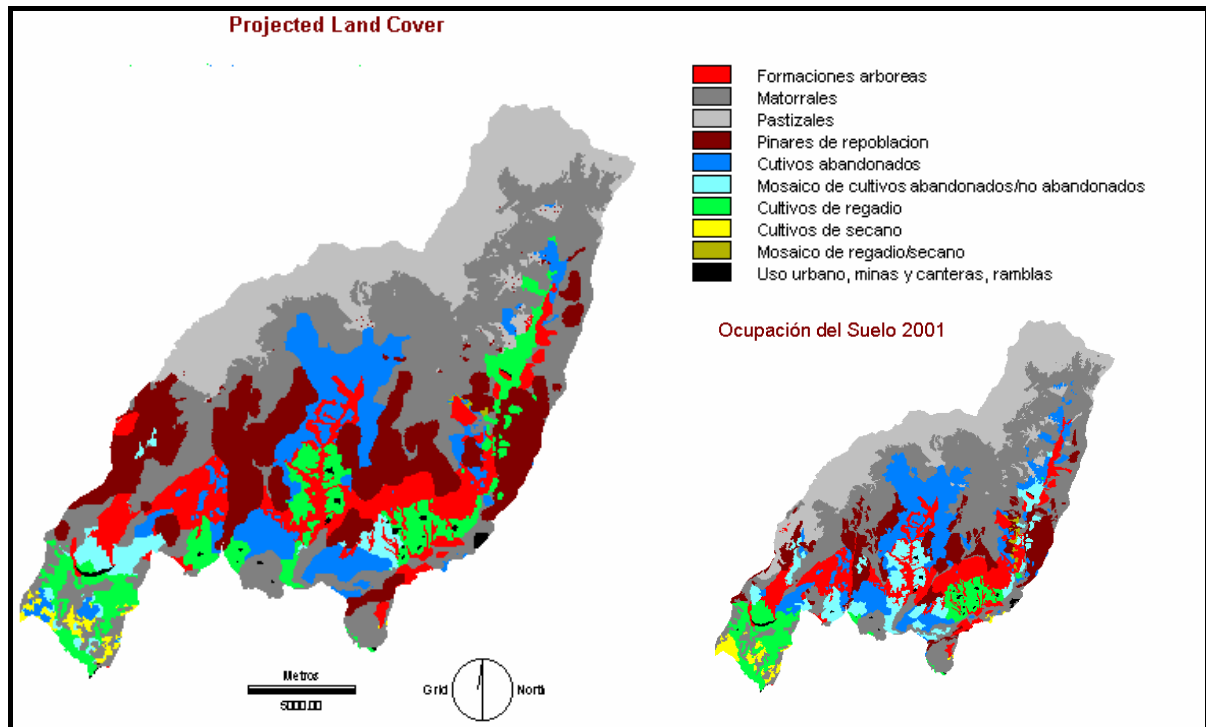


**Figura 3 – Proyección según CA\_MARKOV en 2000 (basado en 1980 y 1989) y Ocupación del suelo real en 2000. Garrotxes**

Fuente: Elaboración propia



El resultado es un mapa de probabilidad para el año 2000 (Garrotxes) (Figura 3) y 2001 (Alta Alpujarra) (Figura 4) que, a diferencia del obtenido mediante la aplicación exclusiva de las cadenas de Markov y del algoritmo de proyección estocástica, tiene en cuenta la relación entre la ocupación del suelo y el conjunto de variables consideradas en la fase de Evaluación multicriterio.



**Figura 4 – Proyección según CA\_MARKOV en 2001 (basado en 1957 y 1987) y Ocupación del suelo real en 2001. Alta Alpujarra**

Fuente: Elaboración propia

#### **4. Conclusiones acerca de la aplicación del método de modelización prospectiva basado en Sistemas de Información Geográfica**

Los resultados anteriores, obtenidos del análisis paralelo de dos áreas de estudio comparables aunque caracterizadas por una dinámica específica nos permiten evaluar el método utilizado y concretar sus aportaciones y también sus límites.

En primer lugar hay que indicar que una de las limitaciones de la proyección estocástica es la necesidad de contar con las mismas categorías en todas las fechas de la serie temporal, de tal forma que la desaparición o nueva aparición de alguna de ellas impide aplicar el algoritmo de modelización. Es el caso de la clase “Cultivos en semiabandono o mosaico de cultivos abandonados/ no abandonados”, cartografiada en la Alta Alpujarra en 1987 y en 2001 pero inexistente en la cartografía de 1974, lo que ha obligado a la elección de la fecha de 1957 en su lugar. A pesar de que teóricamente un número mayor o menor de unidades temporales transcurridas no obstaculiza el cálculo, sí es cierto que una serie temporal irregular puede ocultar dinámicas acaecidas que son fundamentales para la extrapolación futura. Además, esta limitación implica que la proyección estocástica sólo es posible si no existen nuevos usos del

suelo o bien si no desaparecen algunos de ellos, lo que constituye una exigencia incompatible con la propia dinámica espacio-temporal de los paisajes.

La proyección estocástica no expresa sino la probabilidad de que la aptitud hacia una categoría de ocupación del suelo supere una repartición aleatoria (siendo ésta diferente en cada iteración). A cada píxel se le atribuye una de las categorías consideradas según la aptitud más adecuada. Además, el proceso de asignación no tiene en cuenta los criterios topológicos o de proximidad. En consecuencia, la representación cartográfica simula un efecto « picado de viruelas » (pock-marked), a pesar de que las grandes tendencias de la dinámica sean visibles. De hecho, no se trata sino de un resultado intermedio que arbitra las probabilidades markovianas de transición entre categorías de ocupación del suelo a través del tiempo según criterios estrictamente probabilísticos.

Para obtener un resultado que integre el carácter espacial (probabilidad condicionada también por el entorno local), se aplica a las cartografías obtenidas por la proyección estocástica los algoritmos recogidos en el módulo CA\_MARKOV. Con esta función, y basándose en las dos últimas fechas conocidas previas a la extrapolación de 2000/2001, se obtiene un índice de asociación de 0.76 (Garrotxes) y 0.75 (Alta Alpujarra) entre la cartografía proyectada y la cartografía real. Es necesario indicar, no obstante, que la correlación es variable en función de cada categoría de ocupación del suelo. Este hecho parece estar ligado tanto al tipo de uso del suelo como a los factores tomados en consideración, que presentan un grado de predicción diferente y específico para cada categoría. A este hecho se añade un límite inherente a la categorización de la ocupación del suelo (sobre todo en lo que concierne a la transición y transformaciones entre diferentes categorías, como es el caso del matorral subserial y el bosque de frondosas en los Garrotxes, o las categorías de cultivos abandonados, semiabandonados y cultivos en activo en la Alta Alpujarra) y al número de estados del sistema conocidos y su distancia temporal.

En concreto, en el caso de los Garrotxes la modelización lleva a un resultado muy próximo de la realidad en el 2000 para la categoría de bosque de coníferas. Las frondosas están subestimadas, mientras que las categorías de matorral subserial y landas están sobreestimadas. Esto es debido a la relativa estabilidad que sufren estas categorías entre 1980 y 1989, que contrasta con la rápida evolución hacia el bosque de frondosas manifestada entre esta última fecha y el año 2000. Por lo tanto, sería necesario ajustar el método precisando la evolución interna de cada categoría mediante la ampliación del número de las mismas a fin de responder mejor a la rápida dinámica vegetal que caracteriza esta comarca pirenaica.

En la Alta Alpujarra, los desajustes en la modelización para el año 2001 responden a dos procesos bien distintos que rompen con las tendencias detectadas en el paisaje en décadas anteriores. Por una parte, la menor intensidad de las campañas de repoblación forestal en la última década conlleva una sobreestimación de la categoría de pinares de repoblación para el 2001, que es además muy explícita por afectar a las zonas colindantes con las antiguas masas repobladas. Un filtro de contigüidad menor del utilizado podría mitigar este efecto. En

segundo lugar, el semiabandono de la agricultura de regadío o la configuración de paisajes en mosaico con parcelas cultivadas y parcelas abandonadas son procesos que se han acelerado desde finales de los años ochenta, lo que impide su correcta estimación en la modelización y, como consecuencia, una sobreestimación de los usos agrícolas activos.

La posibilidad de considerar en la fase de Evaluación multicriterio las dos fechas anteriores a la proyección (1980 y 1989 en los Garrotxes, 1957 y 1987 en la Alta Alpujarra), y no sólo la más reciente, podría paliar algunos de los problemas comentados con anterioridad, especialmente en el caso de los Garrotxes. Un ensayo aplicado a esta área en el que se atribuye un grado de aptitud máxima a aquellas categorías que no sufren transformación entre ambas fechas da como resultado una proyección para el 2000 cuyo índice de asociación con respecto a la cartografía real aumenta a un 0.774.

En cualquier caso, parece evidente que un método de modelización que contemple evoluciones no lineales se ajustará más adecuadamente a la dinámica paisajística de las áreas de estudio, afectadas por transformaciones de muy diverso origen y cadencia temporal a lo largo de la segunda mitad del siglo XX.

## **5. Bibliografía**

- BARREDO CANO, J.I. (1996): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Edit Ra-ma. Madrid.
- BISHOP, C.M. (1994): *Neural Network for Pattern Recognition*. Oxford University Press.
- CAMACHO OLMEDO, M.T., PAEGELOW, M. y MENOR TORIBIO, J. (2000): "Límites y aportaciones de los Sistemas de Información Geográfica para trazar la dinámica espacio-temporal del paisaje en áreas montañosas mediterráneas". *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*, pp. 381-401. Universidad de Alcalá de Henares.
- CARDOT, H., FERRATY, F. y SARDA, P. (1999): "Functional linear model". *Stat. & Proba. Lett*, 45, pp 11-22.
- CARVER, S.J. (1991): "Integrating Multi-Criteria Evaluation with Geographical Information Systems". *International Journal of Geographical Information Systems*, 5, pp 321-339.
- EASTMAN, J.R., KYREM, P.A.K., TOLEDANO, J. Y JIN, W. (1993): "A procedure for Multi-Objective Decision Marking in GIS under conditions of Competing Objectives", *Proceedings of EGIS'93*, pp 438-447.
- GOODCHILD, M.F. y GOPAL, S. (edits) (1989): *Accuracy os spatial databases*. Taylor and Francis, Londres.
- PAEGELOW, M. Y CAMACHO OLMEDO, M.T. (1997): "Dynamique spatio-temporelle de l'utilisation du sol en milieu montagnard méditerranéen. Etude comparative des Garrotxes (Pyrénées Orientales, France) et du Poqueira (Sierra Nevada, Espagne)". *Le Temps de l'environnement*. Presses Universitaires du Mirail, Toulouse, Francia.